

論文 地震荷重を受ける鉄筋コンクリート柱のひび割れ損傷に関する実験的研究

金本 清臣*1・曾根 大貴*2・坂田 弘安*3・和田 章*4

要旨：鉄筋コンクリート（以下，RC）部材を損傷評価する際に，ひび割れ量を用いることは有効であると考えられるが，ひび割れに関するデータが十分に蓄積されていないのが現状である。本研究では，シアスパン比，部材の破壊モード，軸力の有無，せん断補強筋間隔をパラメータとした実部材の約1/2スケールのRC柱試験体6体について静的曲げせん断加力実験を行い，繰返し載荷下における部材のひび割れ性状を明らかにするとともに，部材の損傷程度を表す指標としてひび割れ面積率を算定し，部材角等との関係を示した。

キーワード：鉄筋コンクリート柱，ひび割れ面積，ひび割れ幅，地震，損傷，残留

1. はじめに

兵庫県南部地震によって激しく損傷したRC造建物の中には，倒壊には至らないまでも取り壊されたものが数多くあった。これらを教訓に，RC造建物では安全限界状態のみでなく，修復限界状態を視野に入れた設計法が注目されている。建物の損傷評価は，建物の継続使用に対する安全性，補修の要否などを判断する上で必須である。本研究ではシアスパン比，部材の破壊モード，軸力の有無，せん断補強筋間隔をパラメータとした実部材の約1/2スケールのRC柱試験体6体について静的曲げせん断加力実験を行い，繰返し載荷下における部材のひび割れ性状を明らかにした。また，部材の損傷度を表す指標としてひび割れ面積率を用い，部材角，耐力，部材ふくらみとの関係を示した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体配筋図を図-1に，鉄筋の機械的性質およびコンクリートの材料特性を表-2，表-3に示す。試験体は，実構造物の約1/2スケールを想定し，シアスパン比，主筋強度，せん断補強筋強度および間隔，軸力の有無をパラメータと

表-1 試験体一覧

試験体	幅b×せいD (mm)	試験区間長 L(mm)	シアスパン比 a/D	主筋	引張鉄筋比 pt (%)	せん断補強筋	あばら筋比 pw (%)	軸力比 n
1	320×320	960	1.5	8-D16	0.58	2-D6 @40	0.50	0.0
2								0.2
3								0.0
4								0.2
5								0.0
6								0.0

表-2 鉄筋の機械的性質

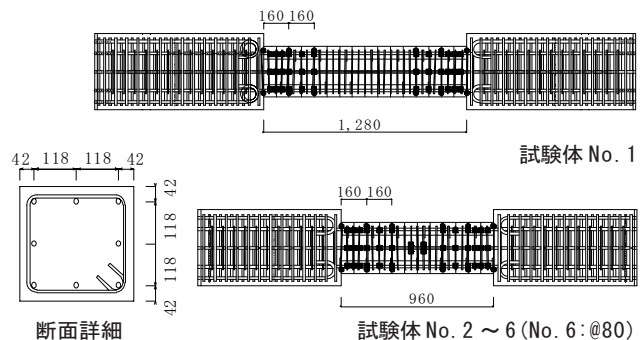
種別	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数Es ($\times 10^5$ N/mm ²)
D6	391*	4924	564	19.2	1.91
D16	391	2032	556	19.1	1.88
S6	831	4672	872	7.0	1.84
S16	1046	6734	1127	4.9	1.92

* : 0.2%オフセット耐力

表-3 コンクリートの材料特性

材齢(日)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数Ec ($\times 10^4$ N/mm ²)
50(試験体No. 3, 5, 6)	23.8	2.35	2.55
69(試験体No. 1, 2, 4)	24.3	2.02	2.5

実験実施日：材齢52~81日



●：主筋，■：せん断補強筋のひずみゲージ貼付位置

図-1 試験体配筋図(単位：mm)

*1 清水建設(株)技術研究所 構造研究開発部研究員 修士(工学) (正会員)
 *2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻
 *3 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)
 *4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

した。加力方法は大野式により、加力点を都度入替えることで交番繰返し加力を与えた。加力は変位制御とし、加力サイクル：部材角 $R = \pm 1/800, \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/25\text{rad}$ で各 2 回ずつ繰返した。

2.2 ひび割れ幅の測定

ひび割れ幅は、ひび割れ観測面に生じた各サイクルのピーク時および除荷時について測定した。ひび割れ幅の測定にはデジタルマイクロスコプ（精度：1/1000mm）を用い、せん断補強筋位置を横切ったひび割れ幅を測定した。せん断補強筋位置を横切らなかったひび割れについては、最大幅を測定した。ひび割れ幅は、ひび割れ面から垂直方向に広がった距離とした。

2.3 曲げ変形および部材のふくらみ測定

曲げ変形および柱成方向のふくらみの測定位置を図-3に示す。曲げ変形は、試験体を材軸方向に6分割した各区分について100mmCDP変位計によって測定した。部材のふくらみ量は、試験体上下面のそれぞれ1/4の範囲に25mmLVDT小型変位計（変位計は正背面に取り付けた部材角計測フレーム間に渡した横架材に固定）を20本設置し、各測定点における柱成方向のふくらみを計測した。

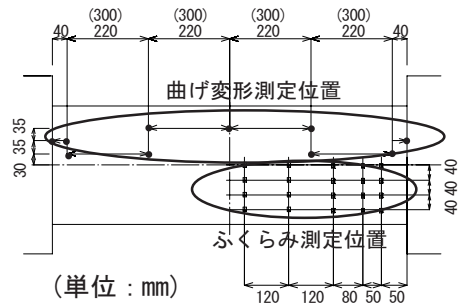


図-3 曲げ変形、ふくらみ量の測定位置
(()内の寸法：試験体 No. 1)

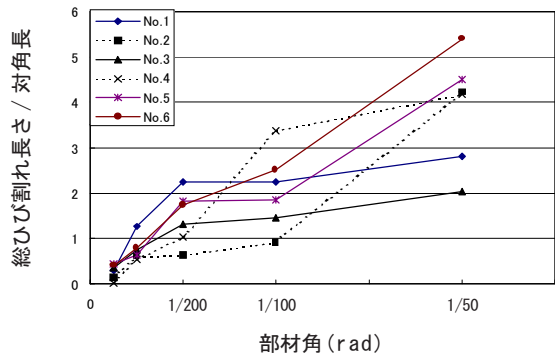


図-4 総ひび割れ長さ / 対角長と部材角の関係

3. 実験結果

3.1 総ひび割れ長さの推移

正加力時の各サイクルにおける総ひび割れ長さ Σl （ひび割れ測定面に生じたひび割れの総長さ）の推移を図-4に示す。総ひび割れ長さは、実験時に記録したひび割れ図から求めた。シアスパンの異なる試験体 No. 1 を含めて全試験体の総ひび割れ長さを比較するため、総ひび割れ長さを試験区間の対角長 ($l_a = \sqrt{D^2 + L^2}$, D : 柱せい, L : 試験区間長) で除した値 ($\Sigma l/l_a$) によって評価した。軸力 0 の曲げ破壊型試験体 No. 1, 3 では、変形の進行にかかわらず総ひび割れ長さの進展は緩やかであった。せん断破壊型および軸力が作用している試験体 No. 2, 4, 5, 6 では、変形能の低い順に $\Sigma l/l_a$ 値が大きくなった。最も脆

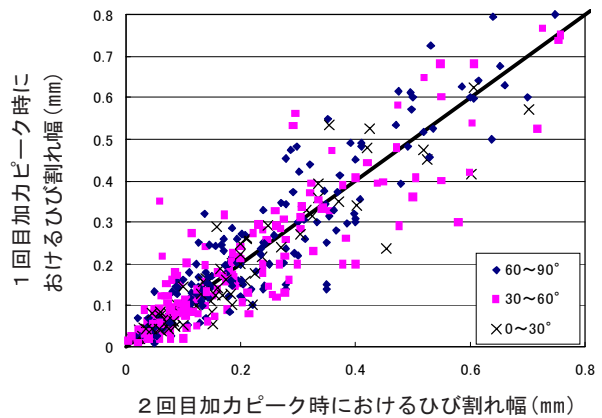
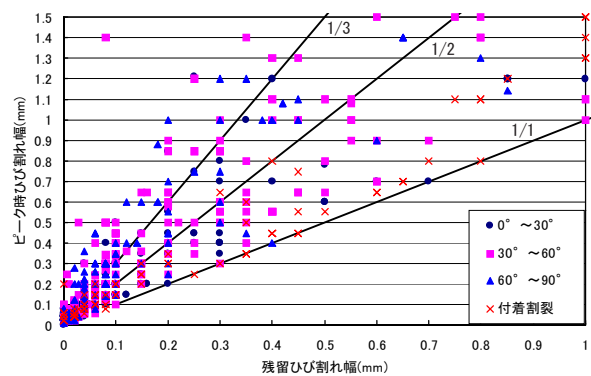


図-5 繰返し加力がひび割れ幅に与える影響



試験体 No. 3 ($a/D = 1.5$, 曲げ破壊型, 軸力 0)

図-6 ピーク時ひび割れ幅と残留ひび割れ幅との関係

性的に破壊した試験体No. 4以外の試験体では $R = 1/200\text{rad}$ までは $\Sigma l/l_d$ 値が漸増し、 $R = 1/100\text{rad}$ 時でひび割れの進展が緩やかになり、以後大きく進展した。これは、せん断力が最大耐力の約9割に達し、曲げ破壊型試験体では主筋が降伏した時期に相当している。

3.2 繰返し载荷がひび割れ幅に与える影響

各ひび割れ幅測定位置のひび割れ幅が繰返し加力によって影響を受けるかどうか確認した(図-5)。ここでは、 $R = 1/100\text{rad}$ までに生じた全試験体のひび割れを、材軸との成す角度が $0 \sim 30^\circ$ (付着割裂ひび割れを除く)、 $30 \sim 60^\circ$ 、 $60 \sim 90^\circ$ の3種類に分類した(以後、それぞれ水平ひび割れ、斜めひび割れ、鉛直ひび割れと呼称)。多少ばらつきは見られるが、全試験体とも繰返し加力および、ひび割れ角度による有意異は認められなかった。

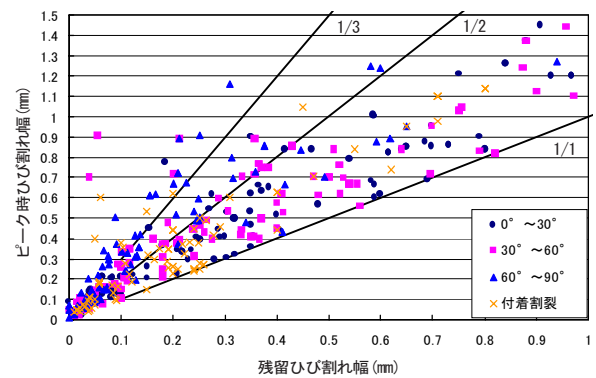
3.3 ピーク時と残留ひび割れ幅の関係

試験体No. 3, 5を代表に、 $R = 1/100\text{rad}$ までに生じたピーク時ひび割れ幅と残留ひび割れ幅との関係を図-6に示す。ピーク時ひび割れ幅に対する残留ひび割れ幅の比 (r_w/w 値) を最小二乗法によって回帰して求めた(表-4)。せん断破壊型試験体 (No. 4~5) の水平および斜めひび割れの r_w/w 値は、曲げ破壊型 (No. 1~3) より大きく、軸力が作用する試験体では鉛直ひび割れの r_w/w 値が小さかった。材軸との成す角度が小さいひび割れの r_w/w 値は大きくなる傾向を示した。全試験体とも r_w/w 値はピーク時のひび割れ幅に比例しており、ひび割れ幅が大きくなると残留ひび割れ幅が閉じにくくなることが分かった。

4. ひび割れによる損傷

各サイクルにおける正加力によって生じたひび割れを対象に、部材角ピーク時ひび割れ幅 w とひび割れ長さ l の積の総和をひび割れ面積と定義する(式(1))。

$$D_a = \Sigma(w \cdot l) \quad (1)$$



試験体 No. 5 ($a/D = 1.5$, せん断破壊型, 軸力0)

図-6 ピーク時ひび割れ幅と残留ひび割れ幅との関係

表-4 ピーク時ひび割れ幅に対する残留ひび割れ幅の比

試験体	鉛直ひび割れ	斜めひび割れ	水平ひび割れ
No. 1	1/2.19	1/2.07	1/1.77
No. 2	1/3.92	1/1.73	1/1.42
No. 3	1/2.19	1/1.84	1/1.55
No. 4	1/3.74	1/1.98	1/1.42
No. 5	1/1.95	1/1.44	1/1.33
No. 6	1/2.33	1/1.68	1/1.82

4.1 鉛直ひび割れによる損傷

曲げ変形から鉛直ひび割れによるひび割れ面積 D_{af} を算定する。曲げ変形 δ_f は式(2)より算定した。

$$\delta_f = \sum_{i=1}^3 (\theta_i \cdot x_i), \quad \theta_i = \frac{\delta_T - \delta_B}{H} \quad (2)$$

ここに、 θ_i : i 番目の曲げ変形測定区間における回転角、 x_i : 部材中央から i 番目の曲げ変形測定区間中央までの距離(mm)、 δ_T, δ_B : 曲げ変形測定区間における試験体上側および下側の変形(mm)、 H : 曲げ変形測定位置間距離(mm)。

鉛直ひび割れ面積と曲げ変形との関係を図-7に示す。同一曲げ変形時において、軸力作用のないせん断破壊型試験体 (No. 5, 6) の D_{af} は、曲げ破壊型試験体 (No. 1, 3) より大きな値を示している。試験部両端の損傷を同程度と仮定し、曲げ変形に対する D_{af} 値が最も大きい試験体No. 5について最小二乗法で回帰すると式(3)が得られる。

$$\frac{D_{af}}{2} = 55 \cdot \delta_{f(L/2)} \quad (3)$$

4.2 水平および斜めひび割れによる損傷

部材角ピーク時のせん断補強筋1本のひずみとこれを横切るひび割れ幅の総和との関係を図-8に示す。危険断面から1Dの範囲内にあるせん断補強筋のひずみは、1組につき3点測定した。1組のせん断補強筋のひずみ分布を図-9のように仮定すると、1組のせん断補強筋の平均ひずみ $\bar{\epsilon}_s$ は式(4)から求まる。

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{\epsilon_a + 2 \cdot \epsilon_b + \epsilon_c}{4} \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ ：ひずみ測定位置 a, b, c におけるせん断補強筋ひずみ(μ)。

全試験体ともせん断ひび割れ発生時のせん断補強筋ひずみは約200 μ であった。図-8において軸力0の試験体No. 1, 3, 5, 6のプロットを最小二乗法で回帰すると式(5)が得られる。

$$\Sigma w = \alpha(1.4 \times 10^3 \cdot \bar{\epsilon}_s - 0.2) \quad (5)$$

ここに、 α ：低減係数 ($n=0$ の時： $\alpha=1.0$, $n=0.2$ の時、 $\alpha=0.7$)。

式(5)をせん断補強筋を横切るひび割れ本数 n で除すると、平均せん断ひび割れ幅 \bar{w} (式(6))が求まる。

$$\bar{w} = \frac{\alpha(1.4 \times 10^3 \cdot \bar{\epsilon}_s - 0.2)}{n} \quad (6)$$

全試験体とも $R=1/100\text{rad}$ まではせん断補強筋を横切る主要なひび割れ本数は1本であったことから $n=1$ とし、 $R=1/100\text{rad}$ までの各サイクルにおける最大せん断ひび割れ幅と最大せん断補強筋ひずみの関係を図-10に示す。試験体No. 1, 3を代表に、 $R=1/200 \sim 1/50\text{rad}$ について式(6)から求めたせん断補強筋を横切るひび割れ幅とせん断補強筋ひずみの関係を図-11に示す。ここでは、各せん断補強筋を横切る最大ひび割れ幅の1/10以下のひび割れ幅は除外し、せん断ひび割れが急増するまでのせん断補強筋を横切るひび割れ本数は一定とした。式(6)に $n=1 \sim$

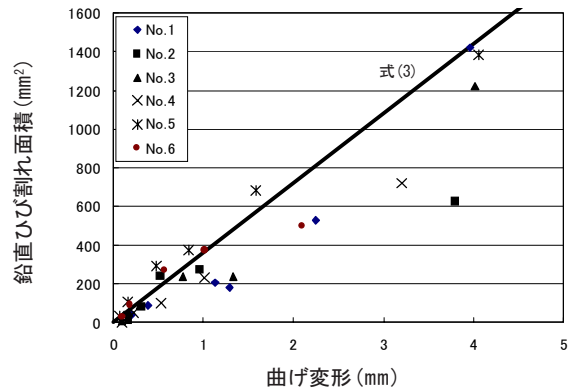


図-7 鉛直ひび割れ面積と曲げ変形の関係

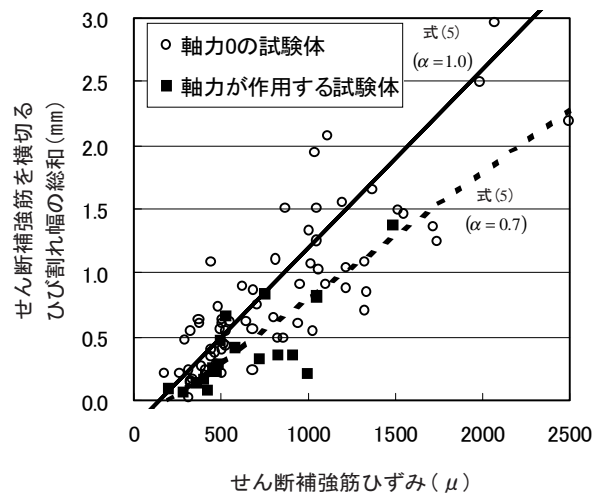


図-8 せん断補強筋を横切るひび割れの総和とせん断補強筋ひずみとの関係

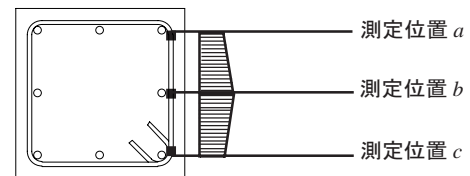


図-9 せん断補強筋のひずみ分布

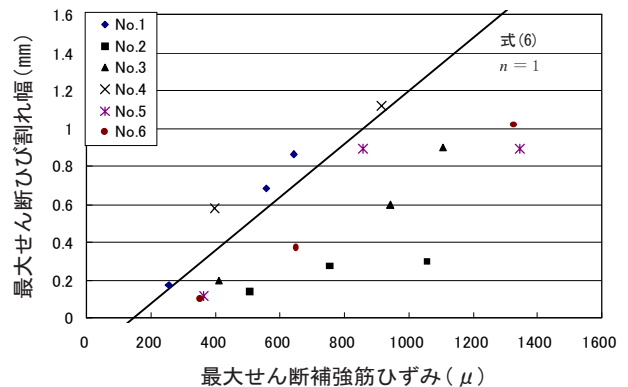


図-10 最大せん断ひび割れ幅と最大補強筋ひずみの関係

4を代入して求めたせん断補強筋直上のひび割れ幅とせん断補強筋ひずみの関係は、ひび割れ本数別のプロットと傾向が概ね一致している。

4.3 水平および斜めひび割れ幅による損傷

水平および斜めひび割れによるひび割れ面積 D_{as} は、せん断補強筋を横切る複数本のひび割れ幅の総和 Σw と複数本のひび割れ長さの総和 l_s との積により算定するものとする(式(7))。 l_s は、ひび割れ図から判断した水平および斜めひび割れの生じる領域の対角長 ($l_s = \sqrt{D^2 + x^2}$: 試験両端部の損傷状態を同程度と仮定) とした(図-12)。各部材角における対角長を表-5に示す。

$$D_{as} = \Sigma(\Sigma w \cdot l_s) \quad (7)$$

4.4 ひび割れ面積率の算定

鉛直および水平、斜めひび割れによるひび割れ面積の総和 ($D_{af} + D_{as}$) をひび割れ幅測定面の全面積 A で除した値をひび割れ面積率と定義する(式(7))。実験値と式(8)による計算値を図-13に示す。損傷が大きくなると計算値が大きくなっているが、概ね安全側に評価できている。

$$r_{Da} = \frac{D_{af} + D_{as}}{A} = r_{Daf} + r_{Das} \quad (8)$$

ここに、 r_{Daf} : 鉛直ひび割れ面積率、 r_{Das} : 水平および斜めひび割れ面積率。

5. 残留ひび割れ面積率の算定

残留ひび割れ面積率 r_{Da} は r_{Da} に r_w/w 値(表-4)を乗じることで求めることができる。

5.1 残留ひび割れ面積率と被災度との関係

残留ひび割れ面積率を文献1)の損傷度(I~IV)と対応づけると以下ようになった。

損傷度 I : $r_{Da} \leq 1.0 \times 10^{-4}$ ($w = 0.2\text{mm}$)

損傷度 II : $r_{Da} \leq 4.0 \times 10^{-4}$ ($w = 0.2 \sim 1.0\text{mm}$)

損傷度 III : $r_{Da} \leq 1.0 \times 10^{-3}$ ($w = 1.0 \sim 2.0\text{mm}$)

損傷度 IV : $r_{Da} \leq 2.0 \times 10^{-3}$ ($w = 0.2\text{mm}$ 以上)

なお、測定したひび割れ幅は寸法効果を考慮し実際の1/2として評価した。³⁾

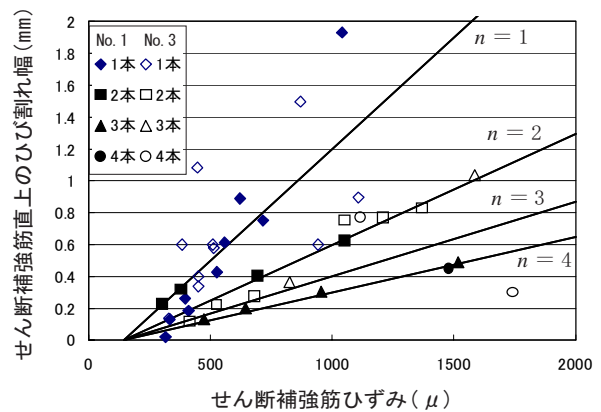


図-11 せん断補強筋直上のひび割れ幅とせん断補強筋ひずみの関係

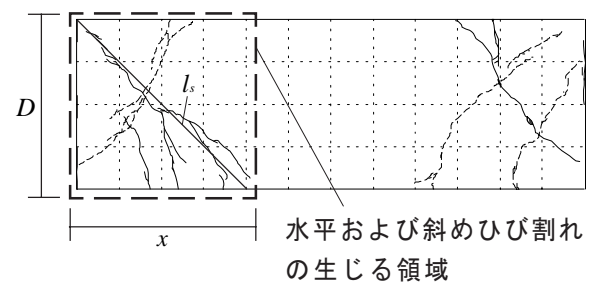


図-12 複数本のひび割れ長さの総和の算定

表-5 各部材角における対角長 l_s (mm)

試験体	1/400	1/200	1/100	1/50
No. 1	716	1154	1290	1290
No. 2	0	453	577	1154
No. 3	577	800	905	905
No. 4	453	577	1154	1154
No. 5	226	905	1154	1154
No. 6	226	1024	1024	1024

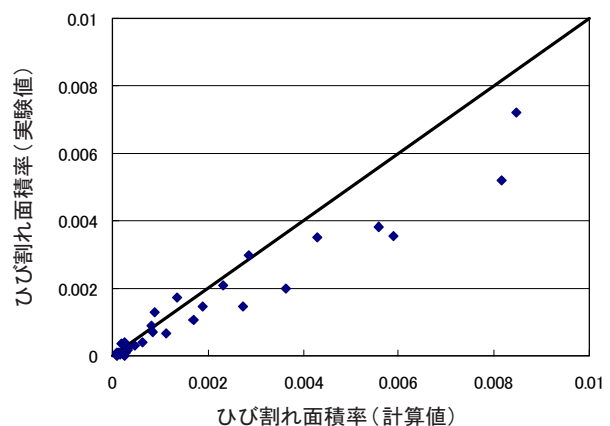


図-13 ひび割れ面積率(実験値)とひび割れ面積率(計算値)の比較

5.2 残留ひび割れ面積率と部材角等との関係

各試験体を破壊性状の違いから、(1)塑性変形能を有する試験体(No. 1, 3), (2)軸力作用下で脆性的な破壊を呈する試験体(No. 2, 4), (3)軸力作用下

にない状態で脆性破壊を呈する試験体(No. 5, 6)の3種類に分類し、残留ひび割れ面積率と部材角、耐力、柱せい方向ふくらみ/柱せいの関係をそれぞれ図-14~16に示す。柱せい方向のふくらみ量は、ふくらみ量が最大となった材端の断面中央部の測定値を用いた。残留ひび割れ面積率は残留ひび割れ幅よりもばらつきが少ないため、部材の損傷度を表す一つの指標となり得ることが分かった。

6. まとめ

地震荷重を受けるRC柱について、ひび割れ性状を把握するための実験を行った。

本実験から、以下の知見を得た。

- (1) ピーク時および残留時のひび割れ面積率は、実験から得られたひび割れを、鉛直、水平および斜めひび割れの3種類に分類し、これら

を足し合わせることで算定できる。

- (2) 残留ひび割れ面積率は、ピーク時のひび割れ面積率に r_w/w 値を乗じることで算定できる。

謝 辞

試験体製作にあたり、高周波熱錬(株)殿にご協力頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)日本建築防災協会:震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針, 2001
- 2) 福山 洋ほか: RC部材のせん断ひび割れに係わる損傷限界の評価, 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集, pp. 13-14, 2000. 9
- 3) 文野正裕ほか: RC柱の損傷状態に基づく残余耐震性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 259-264, 2001

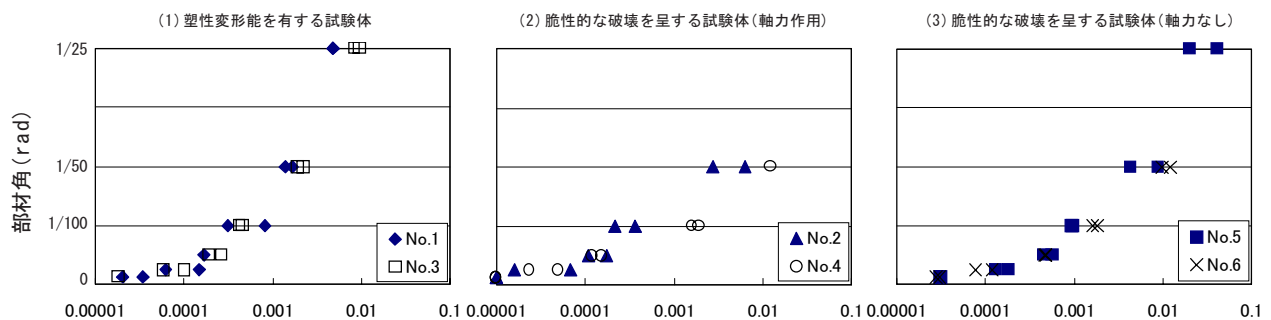


図-14 部材角と残留ひび割れ面積率(横軸)の関係

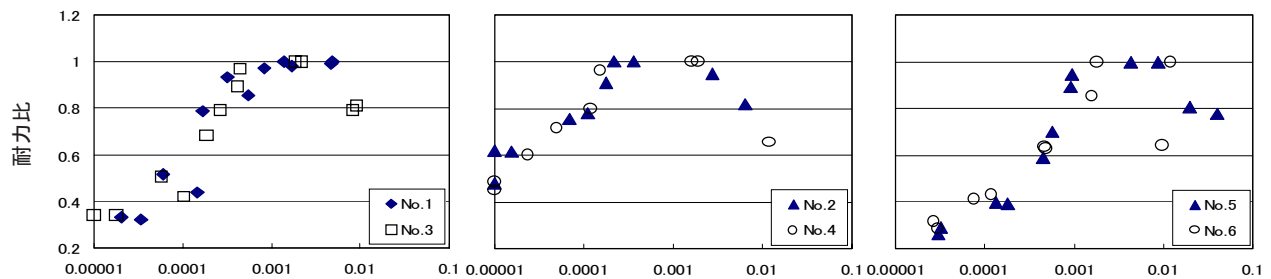


図-15 部材耐力と残留ひび割れ面積率(横軸)の関係

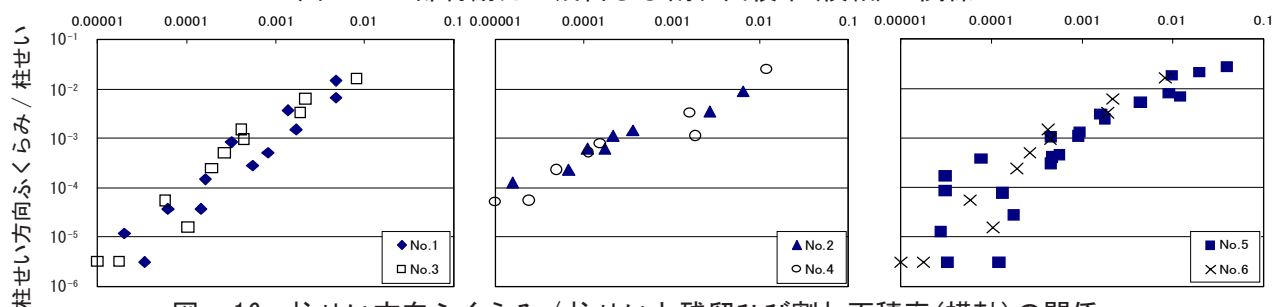


図-16 柱せい方向ふくらみ/柱せいと残留ひび割れ面積率(横軸)の関係